



## Modélisation et analyse des protocoles MAC multi-canaux basés sur l'approche du "canal dédié"

Abdelaziz El Fatni, Guy Juanole, Thierry Val

### ► To cite this version:

Abdelaziz El Fatni, Guy Juanole, Thierry Val. Modélisation et analyse des protocoles MAC multi-canaux basés sur l'approche du "canal dédié". CFIP 2011 - Colloque Francophone sur l'Ingénierie des Protocoles, UTC, May 2011, Sainte Maxime, France. inria-00587122v2

**HAL Id: inria-00587122**

**<https://inria.hal.science/inria-00587122v2>**

Submitted on 6 May 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

## Modélisation et analyse des protocoles MAC multi-canaux basés sur l'approche du “canal dédié”

Abdelaziz El Fatni<sup>\*,\*\*</sup> — Guy Juanole<sup>\*\*</sup> — Thierry Val<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> IRIT, Université de Toulouse, UPS, UTM, INPT  
1 place George Brassens, Blagnac 31703 Toulouse, France  
{elfatni, val}@irit.fr

<sup>\*\*</sup> CNRS ; LAAS, Université de Toulouse, UPS, INSA, INP, ISAE  
7 avenue du colonel Roche, F-31077 Toulouse, France  
{aelfatni, juanole}@laas.fr

---

*RESUME.* L'utilisation dans le cadre des réseaux sans fil de multiples canaux orthogonaux au niveau des protocoles MAC offre une grande potentialité pour améliorer, par rapport à la communication mono-canal, le débit des transmissions. Toutefois, le contexte multi-canal nécessite une fonction supplémentaire au niveau MAC qui porte sur l'allocation et la coordination des canaux. Plusieurs variantes d'allocation de canaux ont été définies et proposées dans la littérature. Cependant, il existe peu d'études basées sur des techniques formelles afin de vérifier les propriétés fondamentales des mécanismes d'allocation. Le but de cet article est précisément de proposer une modélisation formelle et la vérification des protocoles MAC multi-canaux basés sur l'approche du canal dédié à l'aide du modèle RdPTS (Réseaux de Petri Temporisés Stochastiques). Nous vérifions la propriété de réservation en termes d'utilisation en exclusion mutuelle des canaux de données.

*ABSTRACT.* The use of multiple channels in wireless MAC protocols offers a great potentiality for improving the network throughput compared to a mono-channel network. But consequently to the multi-channel aspect, a supplementary function must be addressed in MAC protocol which is the channel assignment. There are many variations for the channel assignment which have been defined and studied in the literature. However, there are few studies considering formal models and verification techniques for the analysis of these protocols. The goal of this paper is precisely to propose a formal modelling and verification of the multi-channel MAC protocols based on the dedicated channel approach using the Stochastic Timed Petri Net (STPN) model. We verify the property of the reservation in terms of mutual exclusion of the data channels.

*MOTS-CLÉS:* Réseaux sans fil, Protocoles MAC multi-canaux, Modélisation formelle, Réseaux de Petri Temporisés Stochastiques, Vérification.

*KEY WORDS:* Wireless networks, Multi-channel MAC protocols, Formal Modelling, Stochastic Timed Petri nets, Verification.

---

## 1. Introduction

L'utilisation de la communication multi-canaux orthogonaux dans les réseaux sans fil au niveau de la méthode d'accès au médium de communication (MAC) permet d'améliorer considérablement le débit du réseau par rapport à la communication mono-canal. En effet, plusieurs transmissions peuvent avoir lieu simultanément sans interférence. Cependant, le contexte multi-canaux ajoute une nouvelle dimension portant sur le mécanisme d'allocation et la coordination des canaux qui doit être prise en compte au niveau MAC dans chaque nœud. Le rôle de ce mécanisme est de décider quel canal peut être utilisé pour la transmission de données.

Il y a plusieurs variantes des protocoles MAC multi-canaux [CRI 08, MO 08, WU 00, WU 02]. Nous considérons l'approche dite du "canal dédié". L'objectif de cet article est de montrer, sur la base du modèle formel RdPTS, le fonctionnement correct du processus de réservation des canaux de données. Ce papier est organisé comme suit. Dans la section 2, nous présentons brièvement l'approche du canal dédié et le modèle RdPTS. La section 3 décrit la modélisation formelle de cette approche à l'aide du modèle RdPTS. La section 4 présente la vérification de la réservation des canaux de données en termes d'exclusion mutuelle. La dernière section conclut le papier.

## 2. Contexte du travail : approche du canal dédié, modèle RdPTS

Dans cette approche, chaque nœud dispose de deux interfaces dont le rôle de l'une, fixée sur un canal dédié aux paquets de contrôle, est de sélectionner le canal de données et le rôle de l'autre est de commuter dynamiquement entre les autres canaux (canaux de données) pour l'envoi et la réception de paquets de données et leurs acquittements. Lors du transfert de données, du fait des deux interfaces, un nœud continue à écouter le canal dédié de façon permanente et maintient une liste d'usage des canaux de données lui permettant d'être au courant des échanges et des rendez-vous établis. Lorsqu'un nœud a un paquet de données à envoyer, il initie un dialogue avec le nœud récepteur en échangeant des paquets de contrôle afin de négocier un canal pour le transfert de données. Des exemples de cette approche ont été développés dans [MO 08, WU 00, WU 02].

Le modèle RdPTS (Réseaux de Petri Temporisés Stochastiques) [ATA 95, JUA 97] constitue une extension temporelle des réseaux de Petri à arc inhibiteur, c'est-à-dire, à chaque transition sont associés un intervalle de temps et une densité de probabilité définie sur cet intervalle. Le comportement dynamique du modèle RdPTS est représenté par un Graphe d'Etat Probabilisé (GEP) qui est isomorphe à une chaîne de Markov discrète. Aux transitions du GEP sont associés une étiquette qualitative (le nom de la transition du modèle RdPTS dont le tir provoque le changement d'état) et deux étiquettes quantitatives ( $p_i$ : la probabilité de tir de la transition,  $\theta_i$ : sa date de tir). Trois différents types d'analyse peuvent être faits sur la base du GEP: qualitative, quantitative et qualitative quantifiée. Ici, nous considérons seulement une analyse qualitative qui permet de vérifier le processus de réservation en termes de relations entre des événements que l'on veut observer (utilisation de la méthode de propriété basée sur l'équivalence observationnelle [MIL 80], obtention de l'automate quotient).

### 3. Modélisation

Nous considérons les hypothèses suivantes : (H1)  $n$  canaux orthogonaux numérotés de 0 à  $n-1$ , disponibles et supposés fiables où le canal 0 est le canal dédié au contrôle, les autres canaux (1 à  $n-1$ ) sont les canaux de données. (H2) Chaque nœud maintient une liste d'usage des canaux structurée de la manière suivante: <canal de données, état du canal (libre, occupé), durée restante d'utilisation (si occupé)>. (H3) La taille d'un paquet de données, notée  $ld$ , est un multiple de la durée minimale d'échange de contrôle notée  $lc$  ( $ld = h * lc$  où  $h$  est un entier  $h > 0$ ) que nous considérons similaire à une structure modifiée du mécanisme RTS/CTS (*Request To Send / Clear To Send*) de IEEE 802.11. (H4) Un canal est dit disponible, soit s'il est libre, soit s'il est occupé mais la durée restante d'utilisation est inférieure ou égale à la durée  $lc$  (devient libre au bout de  $lc$ ). (H5) Le temps de commutation entre les canaux de données n'est pas considéré. (H6) Un seul domaine de collisions est considéré.

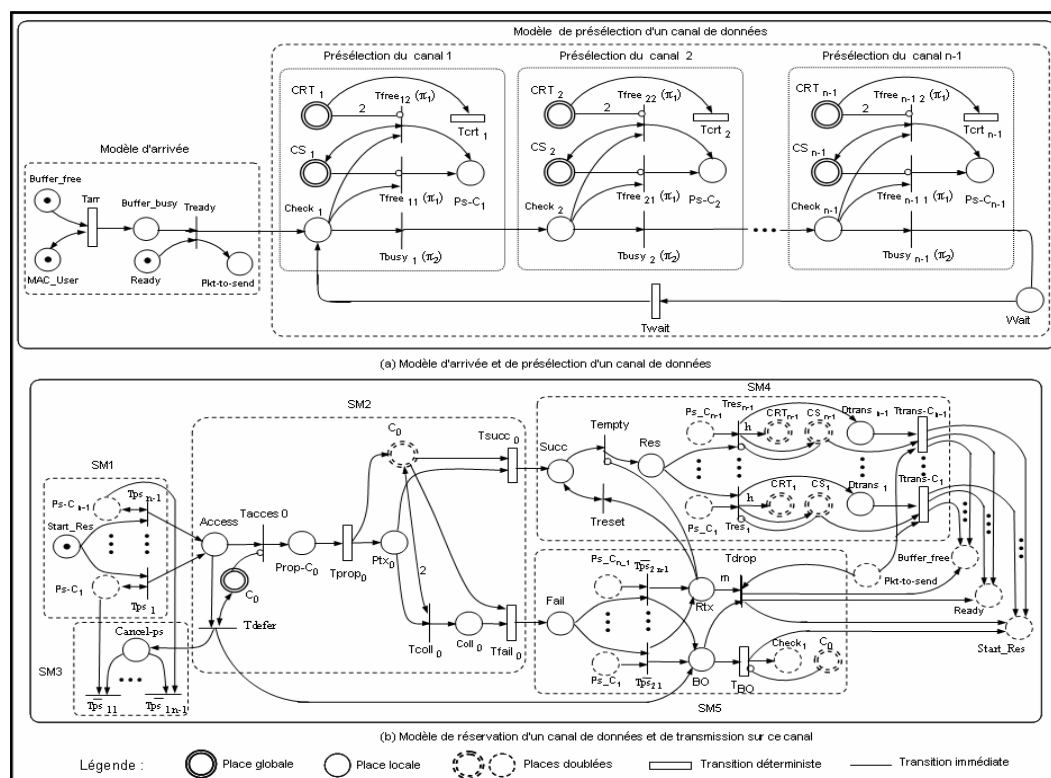
Cette approche est composée essentiellement de deux phases : (i) La présélection d'un canal qui consiste en l'examen dans l'ordre croissant des numéros des canaux de données et la présélection du premier canal disponible. (ii) La réservation d'un canal de données qui se fait à travers l'échange de paquets de contrôle sur le canal dédié pour tenter de réserver le canal présélectionné auprès du nœud destinataire et aussi informer les nœuds voisins. Cette phase peut donner lieu à des collisions dues aux demandes simultanées d'un même canal de données. En cas de succès, le nœud démarre la transmission sans contention du paquet de données sur le canal réservé. A l'issue de celle-ci, les deux nœuds (émetteur et récepteur) libèrent le canal réservé.

Le modèle de chaque nœud (composé des modèles (a) et (b) de la figure 1) est connecté avec les modèles des autres nœuds à l'aide des places globales (voir légende du modèle, figure 1).

(a) Modèle d'arrivée et de présélection d'un canal de données. Le modèle d'arrivée représente une arrivée déterministe d'une demande de service ( $Tarr$ ) et le démarrage conséquent d'une présélection ( $Tready$ ) à partir du canal 1 (place  $Check_1$  marquée). La phase de présélection est composée de  $(n-1)$  sous-modèles similaires interconnectés, où chacun d'eux décrit l'examen d'un canal de données. Les deux places globales  $CS_i$  (*Channel State*) et  $CRT_i$  (*Channel Release Time*) avec  $i \in \{1, \dots, n-1\}$  représentent respectivement l'état du canal (libre, occupé) et la disponibilité du canal s'il est occupé. Les transitions  $Tfree_{i1}$ ,  $Tfree_{i2}$  et  $Tbusy_i$  modélisent l'examen de l'état du canal  $i$ , et sont en exclusion mutuelle due aux deux priorités  $\pi_1$  et  $\pi_2$ :  $\pi_1$  est associée à  $Tfree_{i1}$  et  $Tfree_{i2}$  et  $\pi_2$  est associée à  $Tbusy_i$  telles que  $\pi_1 > \pi_2$ . Par conséquent,  $Tbusy_i$  est tirée uniquement si  $Tfree_{i1}$  et  $Tfree_{i2}$  ne sont pas tirables. Dès que le canal  $i$  est occupé, la place  $CT_i$  contient un jeton et la place  $CRT_i$  contient  $h$  jetons qui sont tirés un par un par la transition  $Tcrt_i$  (de durée  $lc$ ) indiquant la progression de la transmission. Si le canal  $i$  est occupé tel que  $M(CRT_i) > 1$ ,  $Tbusy_i$  est tirée entraînant l'examen du canal suivant. Dans le cas contraire, soit  $Tfree_{i1}$  est tirée ( $M(CRT_i) = 0$ ), soit  $Tfree_{i2}$  est tirée ( $M(CT_i) = 1 \wedge M(CRT_i) = 1$ ) entraînant la présélection du canal  $i$  (place  $Ps-C_i$  marquée). La place  $Wait$  et la transition  $Twait$  modélisent le cas où tous les canaux sont occupés. Le tir de la transition  $Twait$  (d'une durée égale à un *Slot Time* de IEEE 802.11) permet de recommencer les opérations de présélection à partir du canal 1.

(b) Modèle de réservation d'un canal de données et de transmission sur ce canal. Il est composé de quatre Sous-Modèles (SM): SM1, SM2, SM3 et SM4. SM1 représente le démarrage de la réservation (place  $Star-Res$ ) quel que soit le canal présélectionné ( $Ps-C_i$ ,  $i \in \{1, \dots, n-1\}$ ) avec donc

décision d'accès au canal dédié (place *Access*) pour communiquer le choix du canal présélectionné et ensuite tenter de le réserver. Lors de l'accès au canal dédié  $\theta$ , celui-ci peut être occupé, auquel cas on diffère la réservation en annulant la présélection (SM3 avec la place *Cancel-ps* et les transitions  $T_{ps\_li}$ ,  $i \in \{1, \dots, n-1\}$ ) et on entreprend une action du *backoff* (transition *Tdefer* qui amène au SM5). SM2 représente l'échange RTS/CTS sur le canal  $\theta$ . Cet échange peut donner lieu, soit à un succès (transition  $T_{succ_\theta}$ ), soit à une collision (transition  $T_{fail_\theta}$ ). SM2 est détaillé dans [EL 10] et donc pour des raisons de place, nous ne le commentons pas ici. Le tir de  $T_{succ_\theta}$  implique l'entrée dans SM4 qui représente l'initialisation du compte de retransmission (transitions *Treset* et *Tempty*), et par la suite, les opérations de réservation des canaux (places  $CS_i$ ) et de spécification de la durée d'occupation des canaux réservés (places  $CRT_i$ ) avec  $i \in \{1, \dots, n-1\}$ . Lorsque la place  $Dtrans_i$  est marquée, le nœud démarre la transmission de données immédiatement sur le canal de données  $i$  sans contention. A la fin de celle-ci,  $Ttrans-C_i$  est tirée et place un jeton dans les places *Buffer\_free*, *Ready* et *Start\_Res* (réinitialisation du système). Le tir de  $T_{fail_\theta}$  entraîne l'annulation de la présélection (place *Fail*, transitions  $T_{ps\_2i}$ ), et l'incréméntation du compte de retransmissions (place *Rtx*). Si le seuil de retransmissions est atteint ( $m$ ), la réservation est abandonnée (*Tdrop* est tirée) et on se remet dans les conditions initiales de la prise en compte d'une nouvelle demande de réservation. Sinon, on démarre le *backoff* (place *BO*) modélisé par la transition  $T_{BO}$ . A la fin du *backoff*, on redémarre une nouvelle présélection (place *Check<sub>j</sub>*).



**Figure 1.** *Modèle détaillé de chaque nœud – “approche du canal dédié”*

#### 4. Vérification

L'objectif est de montrer que l'approche garantit, quelles que soient les caractéristiques temporelles des demandes et des mécanismes du protocole, l'utilisation en mutuelle exclusion d'un canal et également l'utilisation ordonnée des canaux. Nous considérons un système constitué de deux nœuds N1 et N2 situés dans la même portée de communication, et de 4 canaux (un canal dédié 0, trois canaux de données: 1, 2 et 3). Initialement, aucun canal n'est réservé. On exprime les paramètres temporelles en Unité de Temps (UT) relative à la longueur de l'échange RTS/CTS: la durée d'échange de contrôle  $lc=0.50UT$ , et la propagation  $\delta=0.04UT$ . Nous analysons trois scénarii (S1, S2 et S3) en fonction des instants des demandes de réservations entre N1 ( $t_{arr1}$ ) et N2 ( $t_{arr2}$ ):

(i) **S1** : Demandes en même temps ( $t_{arr1} = t_{arr2}=0.0UT$ ), (ii) **S2** : Demandes décalées telles que :  $t_{arr1} + \delta < t_{arr2} < t_{arr1} + lc$ , ( $t_{arr1}=0.0UT$ ,  $t_{arr2}=0.1UT$ ), (iii) **S3** : Demandes décalées telles que :  $t_{arr1} + lc < t_{arr2}$  ( $t_{arr1} = 0.0UT$ ,  $t_{arr2}=1.0UT$ ). Les autres paramètres temporelles valables pour les trois scénarii considérés sont :  $t_{fail0} = 0.40UT$ ,  $t_{succ0} = lc$ ,  $t_{BO1} = 0.05UT$ ,  $t_{BO2} = 0.60UT$ ,  $ld1 = 3.00lc$ ,  $ld2 = 3.00lc$ .

On veut observer les événements suivants :  $Tarr$ ,  $Tps_i$ ,  $Tfail_0$ ,  $Tsucc_0$ ,  $T_{BO}$ ,  $Tres_i$  et  $Ttrans-C_i$  avec  $i = 1, 2, 3$ . On recherche les automates quotients (graphes de classes d'états notées  $C_j$ ,  $j$  est un entier positif) obtenus par équivalence observationnelle [MIL 80], à partir du GEP par projection sur ces événements. Les automates obtenus sont présentés sur la figure 2.

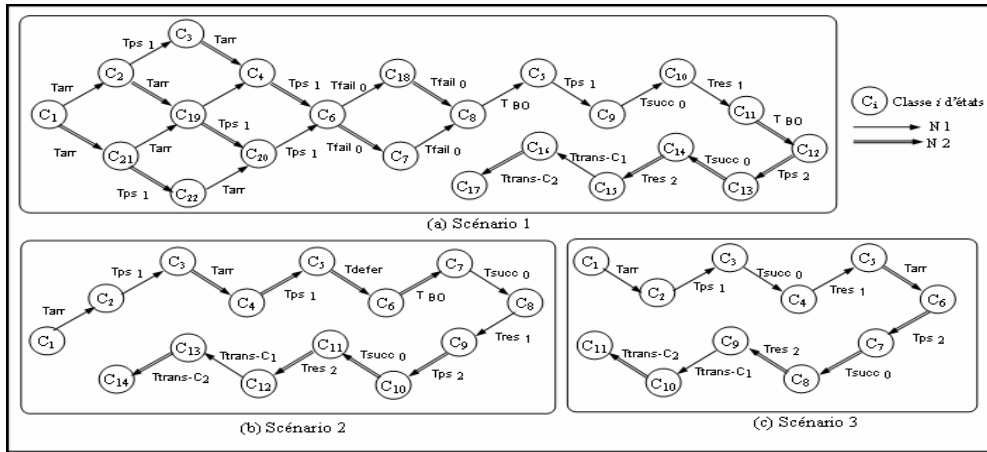


Figure 2. Analyse qualitative des scénarii

**L'automate quotient relatif au scénario 1** montre les arrivées simultanées d'une demande de N1 et N2 ( $Tarr(N1)$ ,  $Tarr(N2)$ ), les entrelacements entre ces arrivées et les démarrages de la présélection (transitions immédiates :  $Tps_1$ ,  $Tps_2$ ) du canal 1 depuis les classes  $C_2$  et  $C_{21}$  jusqu'à la classe  $C_6$  qui traduit l'occurrence d'une collision et donc de la transition  $Tfail_0$ . Ensuite, on voit que comme le *backoff* de N1 (transition  $C_8$ ,  $C_5$ ), est inférieur à celui de N2 (transition  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ), i.e N1 redemande plus tôt une présélection et réserve le canal 1 (transition  $C_{10}$ ,  $C_{11}$ ) avant que N2 ne réserve le canal 2 (transition  $C_{14}$ ,  $C_{15}$ ). On voit ensuite les transmissions du paquet de données par N1 sur le canal 1 (transition  $C_{15}$ ,  $C_{16}$ ), et par N2 sur le canal 2 (transition  $C_{16}$ ,  $C_{17}$ ). **L'automate quotient relatif au scénario 2** montre les arrivées différées de N1 (transition  $C_1$ ,  $C_2$ ), et N2 (transition  $C_3$ ,  $C_4$ ). L'arrivée de la demande de N2 se produit lorsque la présélection du canal 1 par

N1 vient d'être effectuée (transition  $C_2, C_3$ ) et l'échange conséquent sur le canal 0 est en cours. En conséquence, la demande de N2 pour le canal 1 est annulée (transition  $C_5, C_6$ ) ce qui induit le mécanisme du *backoff* pour N2, et donc le redémarrage pour N2 du processus de présélection et de réservation. Ceci entraîne que N1 réserve le canal 1 (transition  $C_8, C_9$ ) avant que N2 ne fasse sa présélection qui se porte forcément sur le canal 2 (transition  $C_9, C_{10}$ ). **L'automate quotient relatif au scénario 3** montre que, compte tenu du décalage temporel des demandes entre N1 et N2, on a logiquement N1 qui prend le canal 1 et N2 (voyant le canal 1 réservé lorsqu'il fait la demande) qui présélectionne et réserve le canal 2.

## 5. Conclusion

La problématique posée par l'allocation et la réservation des canaux dans le cadre des protocoles MAC multicanaux dans les réseaux sans fil est une problématique fondamentale. Le but de ce papier est de montrer l'intérêt de l'utilisation d'un modèle formel, en l'occurrence le modèle RdRTS pour spécifier et vérifier des mécanismes protocolaires multi-canaux. Le modèle utilisé donne une représentation rigoureuse et claire des différents aspects de l'allocation et de la réservation dans l'approche du canal dédié. La vérification qualitative, effectuée à partir des vues abstraites du comportement sur la base de l'équivalence observationnelle, a permis, en particulier, de montrer l'influence des différences temporelles, entre les demandes de réservation des canaux de données et entre les *backoffs* dans les échanges sur le canal dédié, sur le processus d'allocation et de réservation. De nouvelles études sont prévues pour des scénarii plus complexes et une optique d'évaluations de performances.

## 6. Bibliographie

- [ATA 95] ATAMNA Y., JUANOLE G., « Methodology for obtaining abstract views of state graphs labelled with probabilities and time », *MASCOTS'95*, pp. 299-306, NC, USA, Jan. 1995.
- [EL 10] EL FATNI A., JUANOLE G., VAL T., « Formal modelling and verification of the common hopping multi-channel MAC protocols », *13 th ACM MSWIM'10*, pp. 311-318, Turkey, Oct. 2010.
- [CRI 08] CRICHIGNO J., WU M-Y., SHU W., « Protocols and architectures for channel assignment in wireless mesh networks », *Ad Hoc Networks*, Vol. 6, pp. 1051-1077, Sep. 2008.
- [JUA 97] JUANOLE G., GALLON L., « Concept of quantified abstract quotient automaton and its advantage », *FORTE/PSTV'97*, pp. 223-238, Osaka, Japan, Nov. 1997.
- [MIL 80] MILNER R., « A Calculus of Communications Systems », *Springer Verlag*, Vol. 92, Berlin, 1980.
- [MO 08] MO J., SO H-S.W., WALRAND J., « Comparison of Multi-channel MAC Protocols », *IEEE Transactions On Mobile Computing*, Vol. 7, No. 1, pp. 50-65, Jan. 2008.
- [WU 00] WU S-L., LIN C-Y., TSENG Y-C., SHEU J-P., « A New Multi-Channel MAC Protocol with On-Demand Channel Assignment for Multi-Hop Mobile Ad Hoc », *ISPAN'00*, pp. 232-237, USA, Dec. 2000.
- [WU 02] WU S-L., LIN C-Y., TSENG Y-C., SHEU J-P., « A Multi-Channel MAC Protocol with Power control for Multi-Hop Mobile Ad Hoc Networks », *Computer Journal*, Vol. 45, No. 1, pp. 101-110, 2002.